基于 Roach II 的数字频谱仪开发设计

刘晔[1,2]，刘奇[1,2]，李健[1,2]，王玥[1,2]

(1.中国科学院新疆天文台，新疆 乌鲁木齐 830011; 2.新疆微波技术重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要：为实现宽频带电磁环境实时测量，基于 Roach II 开发平台，开发设计了数字频谱仪，实时带宽 10MHz−2GHz，动态范围达到 55dB。首先，分析了数字频谱仪开发设计理念和模块参数设置考虑，实现快速扫描模式、脉冲监测模式测试功能。其次，通过频率响应、动态范围、线性度等关键指标测量及分析，并与商用频谱仪测量结果对比，确定该数字频谱分析仪具有相对准确的测试精度，可应用于射电望远镜台站宽带实时频谱监测及瞬态信号分析。

关键词：数字频谱仪； 开发设计； 性能测试； 信号监测

中图分类号：xxxxx **文献标识码：**x **文章编号：** xxxxxxxxxxx

0 引 言 [1]

随着科学技术的不断发展，频率资源使用率越来越高，10MHz−2GHz 频段被商用设备、通讯设备、广播电视、航空导航、公共安全等广泛应用，使该频段的电磁环境异常复杂。由于射电天文业务具有高灵敏度和较宽工作频率范围的特点，因此射频干扰对射电望远镜观测的影响越来越大，如宽带、瞬态信号，尤其是周期性瞬态信号，对脉冲星观测、快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB)实时搜寻观测的影响较大；同样，宽带、瞬态干扰源对连续谱观测也有较大的影响，原因是宽带、瞬态干扰会导致带宽内总的积分功率相对较高。因此如何捕捉宽带、瞬态信号在射电天文观测中显得十分重要，原因是只有捕捉并消除这些宽带、瞬态信号才能保证射电天文的高效科学产出。

为缓解射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)对天文观测造成较大影响，RFI 工程师在无线电宁静区建设、电磁干扰监测、干扰信号捕捉、频谱分析等方面投入大量精力。美国 Green Bank 100m 射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)将两套 RFI 监测系统安装于台站内，其中馈源臂附近的 RFI 监测系统运用与接收机相同的本振信号进行降频处理，并使用 2 × 40MHz 宽带 FFT 频谱仪，测试速度快且灵敏度高，能够对台站 RFI 进行有效的监测[1]。荷兰 WSRT（Westerberg Synthesis Radio Telescope）观测站开发了频谱监测系统，频率范围为 20MHz-3000MHz，将控制和数据分析集成与一体，实现了数据存储、分析、搜寻、成图等非常方便的电波环境监测系统[2,3]。FAST 和上海天马 65 米均建立了适合望远镜需求的电磁环境监测系统[4]。新疆天文台为确保新疆奇台 110 米全可动射电望远镜 (Qi Tai Radio Telescope, QTT) 建设阶段台址各类电磁干扰的有效监测，自主设计开发了自动化、高可靠性的电磁环境监测系统，监测频段为 0.1−12GHz，可实现台址各类电磁信号的有效监测[5]。

但上述电磁环境监测系统对宽带、瞬态电磁干扰信号的捕捉具有一定的局限性，如系统中采用的商用频谱仪的实时带宽通常不超过 40MHz，且采用扫频模式，频谱测量效率较低。所以，本文拟采用天文领域应用较为广泛的 Roach II 硬件开发平台，完成快速扫描模式和

*基金项目：中国科学院“西部之光”人才培养引进计划 (2019-XBQNXZ-B-020); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目 (2019D01B53); 国家自然科学基金 (11973077); 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费支持项目资助

收稿日期：xxxxxxxxx； 修订日期：xxxxxxxxx

作者简介：刘晔，男，硕士，工程师，研究方向：电波传播仿真分析及EMC测试. Email: liuye@xao.ac.cn

通信作者：刘奇，男，博士，高级工程师，研究方向：电磁兼容技术、电磁环境效应. Email: liuqi@xao.ac.cn

脉冲监测模式的数字频谱仪的开发与设计，为射电天文台址宽频带、实时电磁环境监测提供支持。

1 系统设计

本文基于 Roach II 开发平台设计研制的数字频谱仪，采用奈奎斯特采样、多相数字滤波设计、快速傅里叶变换理论，通过改变通道数量设计和扫描时间实现快速扫描模式和脉冲监测模式。

Roach II 开发平台作为当前天文领域应用较为广泛的硬件平台，具有可重构开放式计算机体系结构和独立的可编程功能，同时更多的模块化设计可满足不同性能指标设计的要求。Roach II 开发平台的构造主要围绕 Virtex-6 系列 FPGA 芯片来构建，可运行 Linux 操作系统，带有两个 Z-DOK 接口，可接连很多种输入输出接口的板卡，如模数转换、数模转换和其他设备等，在数字频谱仪设计中主要用于接 ADC 板卡，当前可用 3GS/s-8bit、5GS/s-8bit、10GS/s-4bit 等多款 ADC 卡以满足不同采样带宽需求[8]。

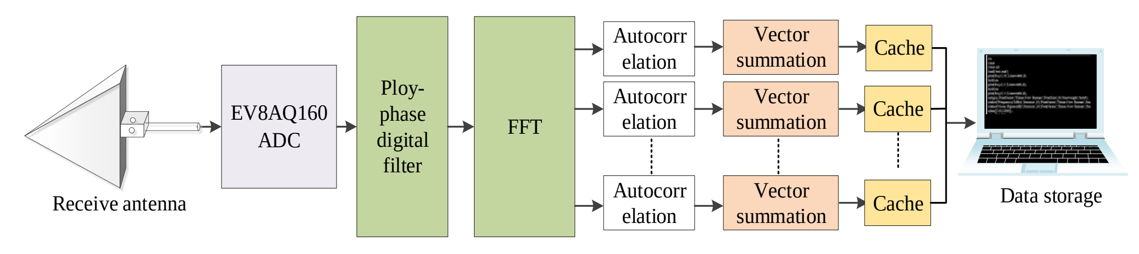


图 1. 数字频谱仪设计流程

Fig.1 Design process of the digital spectrum analyzer

如图 1 所示，ADC 经过奈奎斯特采样将采样量化后的数字信号首先经过多相滤波器滤波处理并进行通道划分，然后将信号经过快速傅里叶变换来进行时域到频域的转换，得到的频域信号数据进行自相关，最后将数据进行矢量累加，经缓存整合后进行数据存储。

1.1 ADC 采样及选型

ADC 作为数字采样的重要组成部分，其性能指标和采样率的合理设置是整个数字频谱仪设计的重点。根据奈奎斯特采样定理，确定频段间隔的信号，为保证信号在采样后完整的还原信号，则采样频率必须大于等于该信号的最高频率的两倍，即

$$f_{\text{sample}} \geq 2f_{max} \quad (1)$$

式中 f_{sample} 为采样频率，f_{max} 为信号的最高频率。

按照奈奎斯特采样定理，设计 2G 带宽的数字频谱仪要求 ADC 的采样频率大于或等于 4G，高采样频率会加大数据量，因此在对 ADC 进行选型时，对其性能提出较高的要求。硬件平台中采用的是型号为 EV8AQ160 的 ADC 板卡，板卡内部集成了 1:1 和 1:2 的数据多路分离器(DMUX)和 LVDS 输出缓冲器，可降低输出数据率，方便与多种类型的高速 FPGA 直接相连，实现高速率的数据存储和处理。同时 EV8AQ160 板卡内集成了 4 路 ADC，可以工作在 3 种模式下，分别为采样率为 1.25Gsps 的四通道模式，采样率为 2.5Gsps 的双通道模式及采样率为 5Gsps 的单通道模式[9]。数字频谱仪的开发采用的是采样率为 5Gsps 的单通道模式，输出数据宽度为 8bit。另外，为了补偿由于器件参数离散和传输路径差异所造成的采样数据误差，该 ADC 板卡针对每路 ADC 数据的积分非线性、增益、偏置、相位做了控制和校正。

1.2 多相数字滤波

如何实现抽取前或内插后的数字滤波是采样率变换的一个十分重要的问题，为避免其在采样过程中出现混叠现象，数字滤波器的设计显得尤为重要[10]。

假设$x(m)$为信号输入，$y(m)$为信号输出，定义其δ函数为δ(m)，则其表达式可表示为：

$$\mathrm{y(m)} = \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(k) \cdot x(\mathrm{m-k}) \tag{2}$$

卷积形式：

$$\mathrm{y(m)} = \delta(m) * x(m) \tag{3}$$

基于数字滤波器的原理，在数字频谱仪开发中运用多相数字滤波算法，其信道划分如图2所示。

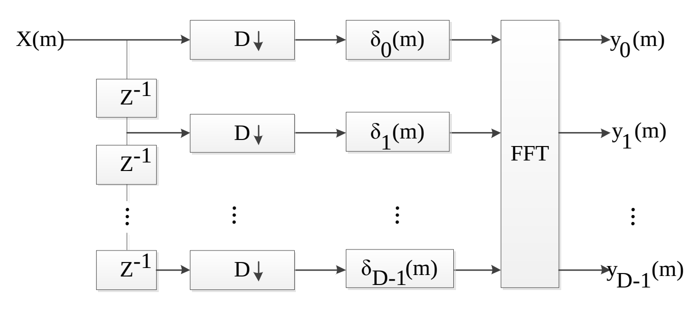


图 2. 多相数字滤波信道划分

Fig.2 Channel division of polyphaser-filter

假设 FIR 的转移函数[11]为

$$\mathrm{H(z)} = \sum_{m=0}^{N-1} \delta(m) z^{-m} \tag{4}$$

式中 N 为滤波器的长度，如果将冲击响应δ(m)分为 D 组，且 N 为 D 的整数倍，即 N/D=j，则转移函数的多相表示为：

$$\begin{aligned}\mathrm{H(z)} = {} & \delta(0)z^0 + \delta(D)z^{-D} + \cdots + \delta[(j-1)D]z^{-(j-1)D} + \delta(1)z^{-1} + \delta(D+1)z^{-(D+1)} + \cdots \\ & + \delta[(j-1)D+1]z^{-[(j-1)D+1]} + \delta(2)z^{-2} + \delta(D+2)z^{-(D+2)} + \cdots \\ & + \delta[(j-1)D+2]z^{-[(j-1)D+2]} + \cdots + \delta(D-1)z^{-(D-1)} + \delta(2D-1)z^{-(2D-1)} \\ & + \delta[(j-1)D+D-1]z^{-[(j-1)D+D-1]} \\ = {} & \sum_{m=0}^{j-1} \delta(mD)(z^D)^{-m} + z^{-1} \sum_{m=0}^{j-1} \delta(mD+D-1)(z^D)^{-m} + \cdots + z^{-(D-1)} \sum_{m=0}^{j-1} \delta(mD+D-1)(z^D)^{-m}\end{aligned} \tag{5}$$

定义H(z)的多相分量为：

$$E_k(z^D) = \sum_{m=0}^{j-1} \delta(mD+k)(z^D)^{-m} \tag{6}$$

所以

$$\mathrm{H(z)} = \sum_{k=0}^{D-1} z^{-k} E_k(z^D) \tag{7}$$

数字频谱仪开发设计中采用 PFB 模块、有限脉冲响应滤波器、FFT 模块组成多相滤波器。其中 PFB 模块设置通道数目，频率通道的数目对应的是 FFT 运算点数的一半，原因是只进行实数信号的 FFT 运算。即快速扫描模式 PFB 模块设置为 16384，得到 8192 个通道的滤波器组，脉冲监测模式 PFB 模块设置为 2048，得到 1024 个通道的滤波器组。多相数字滤波设计的优点主要表现为通过通道划分抑制邻通道干扰，降低数据计算量，为高效率实时信号的采集实现提供途径。

1.3 总体架构设计

依据上述设计流程及理论基础，运用 MATLAB/Simulink 和 Casper Toolflow 库，采用模块化设计思想，分别实现快速扫描模式和脉冲监测模式两种测量模式的设计。快速扫描模式和脉冲监测模式的总体架构设计相同，就数字采样、多相数字滤波、FFT 点数、矢量累加模块、Bram 模块等模块的参数做了相应的更改，以实现不同测量模式的需求和设计。

1）参数设置：如图 3 所示，数字频谱仪总体架构设计主要由数字采样、多相数字滤波、快速傅里叶变化、自相关、Delay 模块（蓝色）、矢量累加设计、Bram 模块（黄色）等组成。

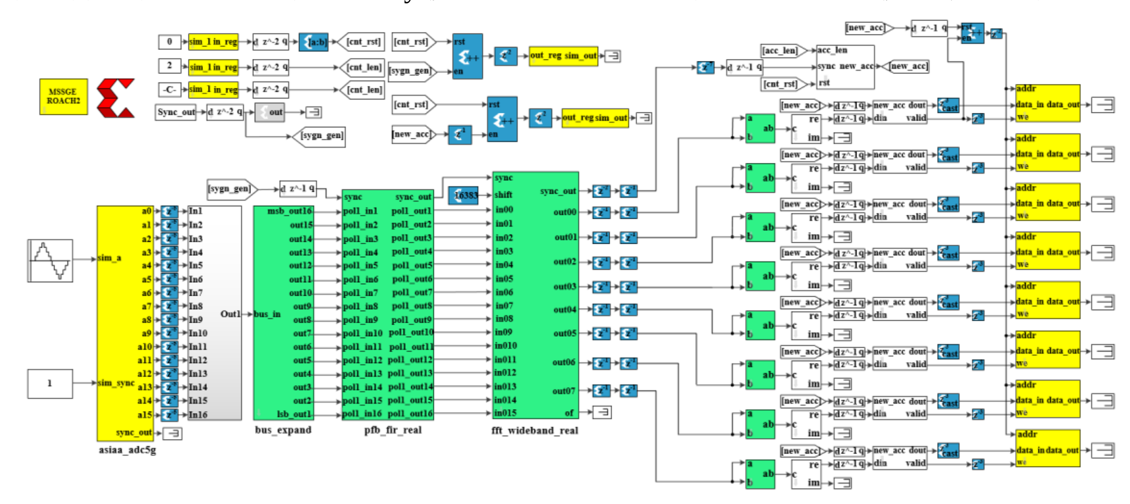


图 3. 数字频谱仪图形化程序

Fig.3 Block-diagram representation of the program of digital spectrum analyzer

• Delay 模块为一个移位寄存器，可以配置其延时时钟周期的整数倍，在数字频谱仪设计中采用 Delay 模块将采样数据在时间上对齐。以快速扫描模式为例，2GHz 的带宽，分为 8192 个通道，其分辨率带宽为 244KHz，通过设置 Delay 模块的参数可使频率与通道一一对应，避免出现频偏现象，因此 Delay 模块的设置是整个数字频谱仪设计中非常重要的环节。

• 矢量累加设计采用是 Vacc 模块，其设计如图 4 所示，该模块主要是将数据进行矢量排序累加，另外可消除毛刺对频谱的影响。共有 new_acc 和 din 两个输入端口，其中 new_acc 输入端口是接收一个新的累加开始的脉冲信号，即接收到新的脉冲信号，开始一次累加；din 端口是数据的输入端口，对应一个输出端口 dout，通过设置 dout 端口的参数，可有效控制数据的长度和位数宽度，当完成一次完整的矢量累加，Valid 端口输出布尔型 1，并与 Bram 模块进行交互作用，其他时候则输出为 0。

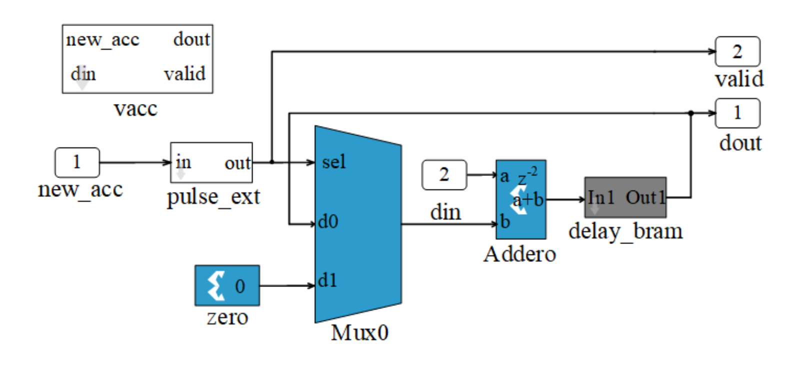


图 4.矢量累加模块

Fig.4 A block diagram showing the vector addition

Vacc 模块中有三个参数设定，其中 vector length 设定的是输入或者输出的矢量的长度。就快速扫描模式而言，FFT 设置是 16384 个点，输出 8192 个频率通道的数据，分为奇数通

道和偶数通道各 4 路信号，因此累加的矢量长度设置为 1024，对应的脉冲监测模式的矢量长度设置为 128。需要注意的是累加是将信号重合的累加，没有做平均处理，所以会使得数据的位数快速增长，为了避免溢出，要控制累加的次数和时间；Number of output bits 设置输出信号的位数；Binary point (output)设置二进制数的所有位数中有多少位的小数位。new_acc 主要是标定一个积分时间的开始，防止矢量数据错位。

- Bram 模块为接口模块，主要用于实现存储功能，在 FPGA 内部以阵列形式呈现。共有 3 个输入端口和 1 个输出端口，如图 5 所示，数据流进入 data_in 端口，从 data_out 端口输出。数据流通过 addr 地址线来控制存储在相应的位置，保持数据排列正确性。其有效存储地址的输入端口和数据流的输入端的同步性是由脉冲信号控制的。

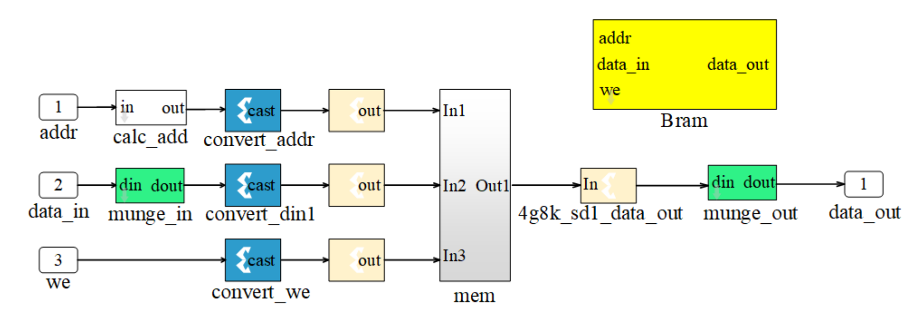


图 5.存储模块

Fig.5 A block diagram showing the storage

Bram 模块读取数据的时间设置应该与数据矢量累加的时间保持一致，这是因为如果读取时间间隔太短则会导致在一定时间段内或者在循环读取数据的过程中，相邻多次的读取结果相同，也就是说重复读取了存储器中没有更新的数据；读取时间间隔较长则会导致储存器更新了多次数据，而如果读取只进行一次，就会使得部分频谱数据遗漏。

2) 编译运行：

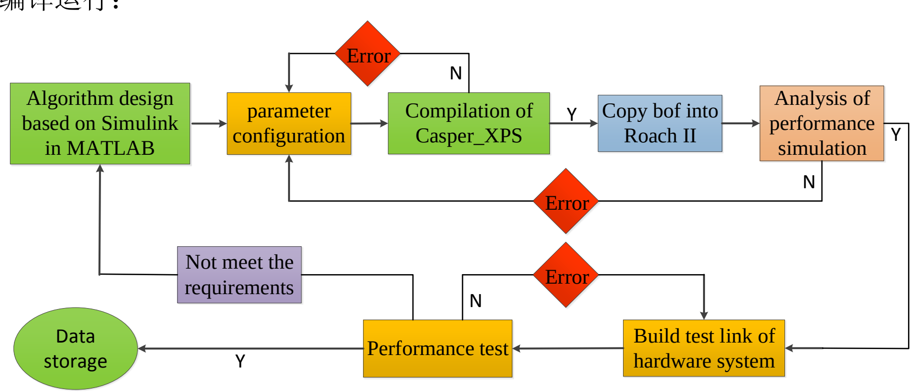


图 6.性能测试流程

Fig.6 Test process of the performance

如图 6 所示，首先，在 simulink 中完成总体架构设计，对各模块进行参数设置，确保数据流相同，点击运行后进行仿真，校验编译前无错误显示。其次在 MATLAB 中输入命令 casper_xps 启动编译，编译生成二进制 bof 文件。最后将编译生成的二进制 bof 文件拷贝到 Roach II 开发平台的相应目录下，并确保 Roach II 开发平台与计算机之间采用千兆以太网连接，采用 Python 语言在 Linux 操作系统中编写数字频谱仪运行的控制脚本，基于 Python 脚本在本地计算机上即可启动 Roach II 开发平台，并进行相应的性能测试及频谱信号测试。

2 性能测试

Python 脚本控制 Roach II 开发平台的运行是实现数字频谱仪测试功能至关重要的一步。首先清除缓存区的各个变量，采用 IP 连接 Roach II 开发平台，连接完成后将要执行的 bof 文件载入 Roach II 开发平台，然后将累加长度、增益大小等软件寄存器的写入数值进行相关设置，并等待 10s 让不正确的频谱输出值过滤掉，读取 8 个 BRAM 模块中的数据并存储在数组中，将 8 个数组交错组合成一个数组，输出并存储。

2.1 动态范围测量

数字频谱仪的动态范围是指频谱仪能测量到的输入端同时存在最大信号与最小信号的比值(dB)，并且对于较小信号允许以给定不确定度测量。因此动态范围的测量是开发设计数字频谱仪的重要指标。构建硬件测试系统，采样时钟由 Valon 5008 提供，性能好，精度高，同时由信号发生器提供外部 10MHz 信号进行锁定，如图 7 所示。

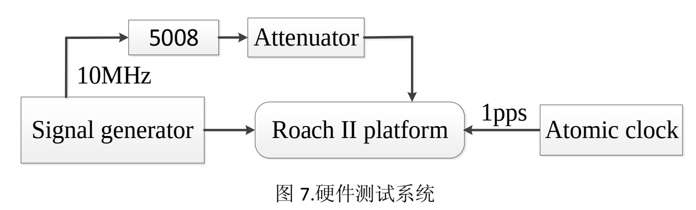
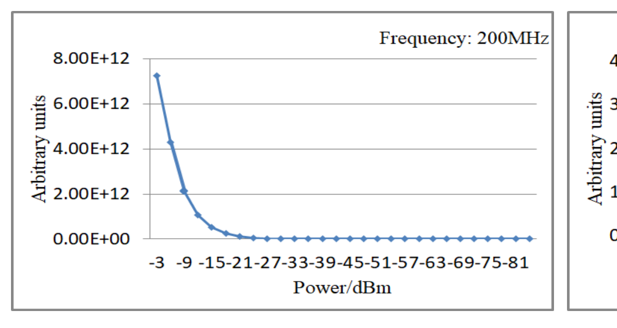
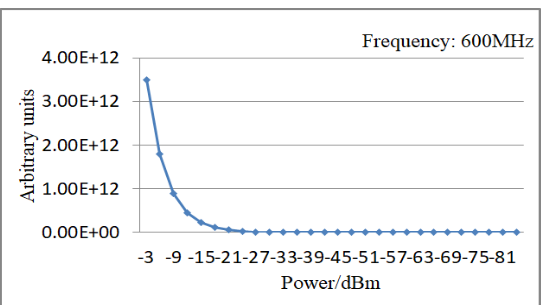
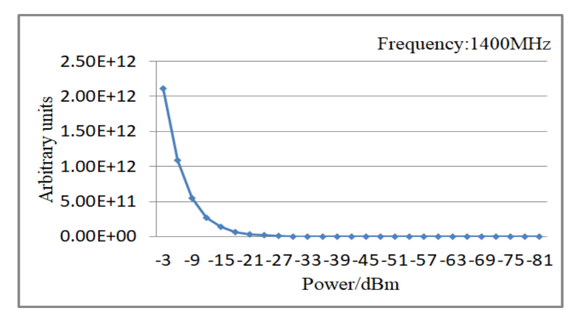


图 7.硬件测试系统

Fig.7 Test system of the hardware







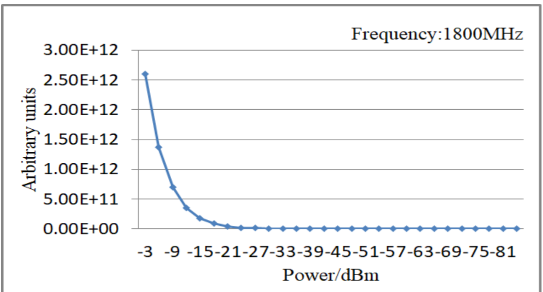


图 8.动态范围测量

Fig.8 Dynamic range measurement

在 10MHz−2GHz 范围内选取 200MHz、600MHz、1400MHz、1800MHz 四个频点，信号发生器输出固定功率，功率值从−3dBm 开始，每次改变−3dBm，测试数字频谱仪的动态范围，假设信号发生器输出的功率值为第 n 个，其对应的数字频谱仪采集的无量纲数值为 $y(n)$，则如果满足公式(4)，即可认为数字频谱仪采集的信号为不失真的有效信号。

$$\mathrm{n} < \mathrm{n}+1, \mathrm{n} > 1; \quad y(n+1) \approx \frac{1}{2}\, y(n) \tag{8}$$

测试结果如图 8 所示，可以看出快速扫描模式和脉冲监测模式在−9dBm 至−64dBm 功率值下满足公式(4)，因此数字频谱仪的动态范围达到 55dB，满足一般宽带、瞬态电磁干扰信

号测量要求。

2.2 线性度测试

线性度测试可有效的检测数字频谱仪在信号监测时其功率响应是否准确，是开发设计数字频谱仪的重要指标。信号发生器输出固定功率值，通过改变频率值可测得数字频谱仪的线性度，由于设计中采集的数据是无量纲的，可通过公式(9)对测得的数据进行量化处理，得到单位为 dBm 的功率值，以信号发生器输出-20dBm 的测试结果为基准，分别量化数字频谱仪测得的其他功率值的测试结果，如图 9 所示。结果显示 1000MHz 为一个坏点，这是由于 ADC 板卡自身的设计缺陷所导致的，其他频点的线性度良好，数字频谱仪设计基本符合要求。

$$P_m = 10log10(c) + b \qquad (9)$$

其中P_m为量化后的功率值，单位为 dBm，c为数据采集的原始数据，无量纲，b为校准系数。

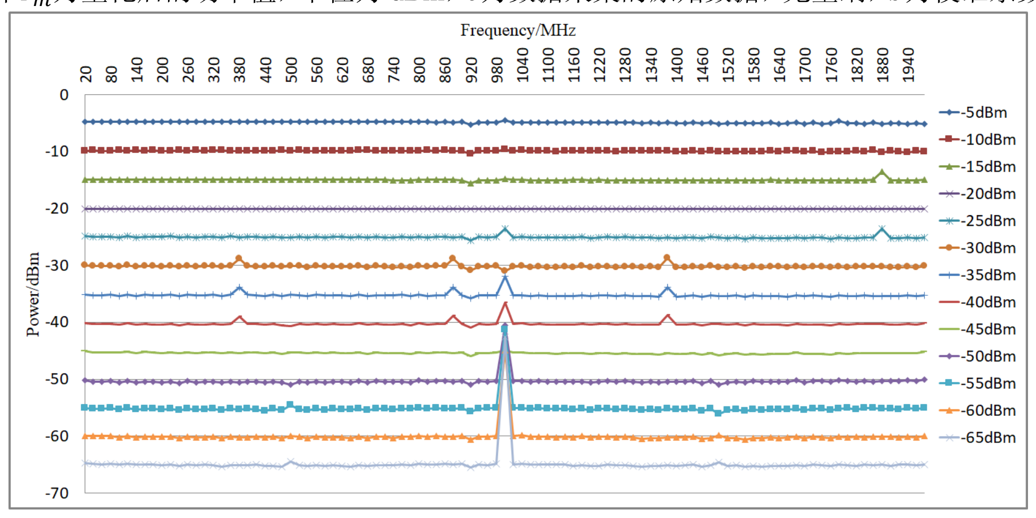


图 9.线性度测试

Fig.9 Linearity measurement

2.3 对比测试

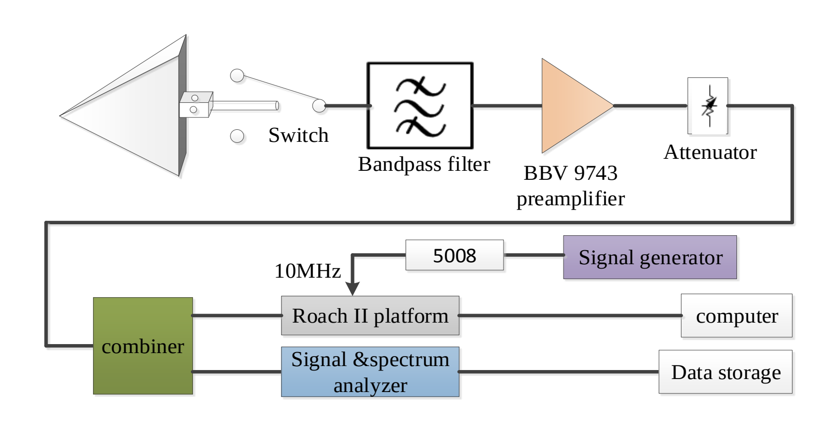


图 10.对比测试链路图

Fig.10 Diagram of comparison test

为验证开发的数字频谱仪准确性，搭建了基于数字频谱仪和商用频谱仪的测量平台，系统链路如图 10 所示。首先信号经过双极化对数周期天线 XSLP9142 后通过带通滤波器做滤

波处理，可有效抑制高于 2000MHz 的信号、干扰及噪声；然后信号通过 BBV9743 前置放大器、衰减器、功分器连接开发的数字频谱仪和 N9030A 商用频谱仪；最后分别存储测试数据并成图。其中系统链路中的信号发生器主要为数字频谱仪提供 10MHz 参考信号。

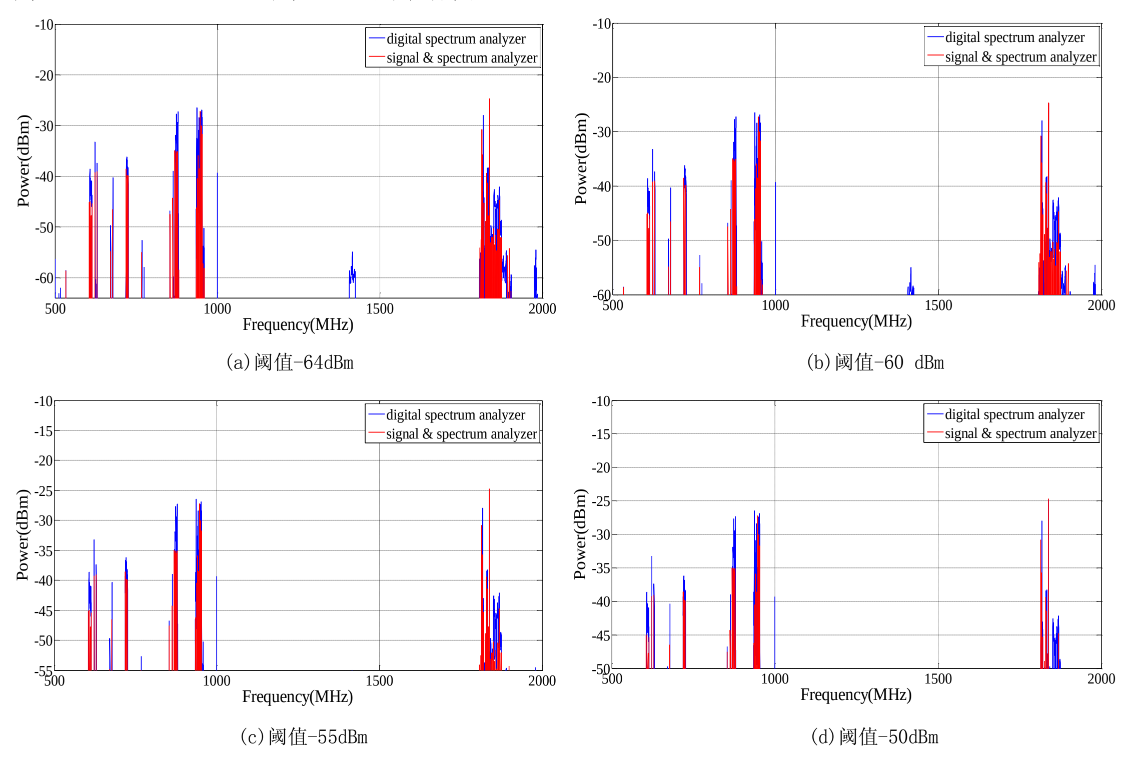
测试时设置数字频谱仪的积分时间为 50ms，设置 N9030A 频谱仪的 sweep 为 50ms，测试频率 10−2000MHz。另外，可通过对 Roach II 开发平台设置不同的阈值与 N9030A 频谱仪做匹配度对比。测试系统设备参数及技术指标如表 1 所示。

表 1. 测试系统设备参数及技术指标

Tab.1 The parameter and technical index of the devices of the measurement system

Device	Model	Frequency	Technical index
Dual-polarized log-periodic antenna	9142	0.8−5GHz	MAX Power:50W，VSWR:<1.5:1,Gain:9dBi, Impedance:50ohm
Preamplifier	9743	10−6000MHz	Noise:2.5dB, Gain:+28dB, VSWR: <2:1, Amplitude flatness:<±3dB
Dual Synthesizer Module	5008	137.5−4400MHz	Amplitude flatness:<±2.5dB, Impedance: 50ohm, Phase noise: <-85dBc/Hz

依据图 10 的测试链路，首先更换不同的滤波器与衰减器进行摸查测试，可有效抑制带外干扰对系统链路造成的影响；然后通过设置不同的阈值进行系统性能测试，寻找最佳临界阈值。图 11 分别为功率阈值-64dBm、-60dBm、-55dBm、-50dBm 的对比结果，其中滤波器为 500−3200MHz，选用 15dB 的衰减器。



(a) 阈值-64dBm (b) 阈值-60 dBm

(c) 阈值-55dBm (d) 阈值-50dBm

图 11. 不同阈值的对比结果

Fig.11 The results of different thresholds

测试结果如图 11 所示，数字频谱仪与商用频谱仪的测试结果整体上有较好的吻合度，但当阈值设置为为-64dBm 和-60dBm 时，数字频谱仪可以采集到 1406−1422MHz、1976−1984MHz 的信号，N9030A 商用频谱仪没有采集到该信号，因为该信号为数字频谱仪内部信号。通过升高阈值发现，−55dBm 是最佳临界阈值，数字频谱仪与商用频谱仪的功率响

应吻合度高，信号的频率响应与商用频谱仪一致。

3 结论

本文基于 Roach II 开发平台，开发设计了实时带宽 10MHz−2GHz 的数字频谱仪，完成了快速扫描和脉冲监测两种不同观测模式开发设计与性能测试。测试结果显示，数字频谱仪的动态范围可达到 55dB，且与商用频谱仪有较好的吻合度，具有相对准确的测量精度，可应用于宽带实时频谱监测、瞬态信号监测等领域，为射电天文台址的电磁干扰分析、频谱管理策略制定、接收机设计等提供支撑。

参考文献

[1] J.R.Fisher. RFI Measurement and Monitoring Facilities [J]. NRAO, P.O. Box2 ,Green Bank, WV. March, 1997.

[2] Willem A.Baan, Peter A.Fridman, Subashis Roy, Robert Millenaar. The RFI Mitigation System at WSRT [J]. PoS(RFI2010)024. March 29-31, 2010.

[3] Hans Van der Marel, Peter Donker. RFI measurements at the WSRT [J]. PoS(RFI2010)028. March 29-31, 2010.

[4] Zhang Hai-yan. Protection Progress on Radio Astronomy Frequencies in China [J]. Progress in Astronomy (张海燕.中国射电天文频率保护进展.天文学进展),2017,35(4):473-480.

[5] Liu Q, Wang Y, Liu Y, et al. Automatic radio environment measurement system for QTT site (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron(刘奇, 王玥, 刘晔, 等. QTT 台址自动化电波环境监测系统. 中国科学：物理学 力学 天文学), 2019, 49： 099512.

[6] C. Rauscher, Fundamentals of Spectrum Analysis [R], Rohde&Schwarz, 2001.

[7] R. Ambrosini, R. Beresford, A.J. Boonstra, S. Ellingson, and K. Tapping, RFI Measurement Protocol for Candidate SKA Sites[R], May 23, 2003.

[8] Pei Xin, Li Jian, Chen Maozheng, Nie Jun. A Design of a Digital Correlator for Microwave Holography Based on the ROACH Platform [J]. ASTRONOMICAL RESEARCH AND TECHNOLOCY(裴鑫，李健，陈卯蒸，聂俊. 基于 ROACH 的微波全息法相关机设计. 天文研究与技术), 2015, 12(1):54-61.

[9] Homin Jiang, Howard Liu. A 5Giga samples per second 8-bit analog to digital printed circuit board for radio astronomy[J]. Astronomical Society of the Pacific,2014,126(942):761-768.

[10] Bai Yong, Hu Zhu-hua. GNU Software Defined Radio [M]. Beijing: Sciences Press(白勇,胡祝华.GNU Radio 软件无线电技术.北京:科学出版社),2017.

[11] Fredric J Harris, Chris Dick, Michael Rice. Digital receivers and transmitters using polyphaser Filter banks for wireless communications[J]. Microwave Theroy and Techniques, 2003, 51(4):1395-1412.

A design of a digital spectrum analyzer based on the

Roach II Platform

Ye Liu[1,2], Qi Liu[1,2], Jian Li[1,2], Yue Wang[1,2]

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences，Urumqi 830011, China;

2. Key Laboratory of Microwave Technology, Xin Jiang, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to archive the real-time measurement of the broadband electromagnetic environment, a digital spectrum analyzer was developed and designed based on the Roach II platform. It has a real-time bandwidth of 10 MHz－2 GHz and a dynamic range of 55 dB. Firstly, by analyzing the development and setting concepts of the digital spectrum analyzer and by considering the module parameter settings, the fast scan mode and pulse monitoring mode of the digital spectrum analyzer were implemented. Secondly, by testing and analyzing of the key parameters such as frequency response, dynamic range and linearity, a comparison with commercial spectrum analyzers was made. The results show that the designed digital spectrum analyzer has archived relatively precise test accuracy and can be applied to the broadband real-time spectrum monitoring and transient signal analysis in the radio telescope stations.

Key words: digital spectrum analyzer; development and design; performance test; signal monitoring